

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2001-318354
(P2001-318354A)

(43) 公開日 平成13年11月16日 (2001.11.16)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	チーコード* (参考)
G 0 2 F 1/09	5 0 2	C 0 2 F 1/09	5 0 2 2 H 0 4 9
	5 0 5		5 0 5 2 H 0 7 9
G 0 2 B 5/30		G 0 2 B 5/30	2 K 0 0 2
G 0 2 F 1/35	5 0 1	G 0 2 F 1/35	5 0 1 5 F 0 7 2
H 0 1 S 3/10		H 0 1 S 3/10	Z 5 K 0 0 2

審査請求 未請求 請求項の数15 O L (全 18 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2000-137604(P2000-137604)

(22) 出願日 平成12年5月10日 (2000.5.10)

(71) 出願人 000003223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号

(72) 発明者 下條 直政

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号 富士通株式会社内

(74) 代理人 100078330

弁理士 笹島 富二雄

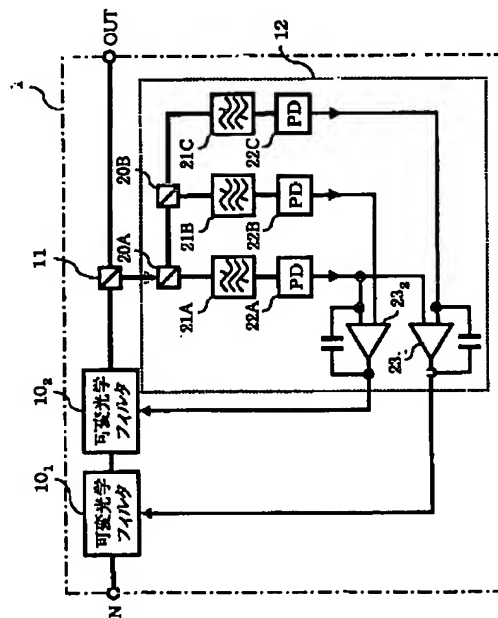
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 利得等化器、並びに、それを用いた光増幅器およびWDM光伝送システム

(57) 【要約】

【課題】 WDM信号光の光パワーの波長特性について、直線的な傾斜だけでなく高次のリップルまでを動的に高い精度で補償でき、かつ、高い信頼度を備えた利得等化器。

【解決手段】 本発明の利得等化器は、磁気光学効果を利用して、透過率の波長特性を変化させることが可能であり、かつ、各々の透過率の波長特性が互いに異なるように設定された可変光学フィルタ10₁、10₂と、該可変光学フィルタ10₁、10₂を透過したWDM信号光の光パワーの波長特性を検出し、各波長間の光パワー偏差が抑圧されるように、各可変光学フィルタ10₁、10₂の透過波長特性をそれぞれフィードバック制御する制御部12と、を備えて構成される。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 WDM信号光の光パワーの波長特性を等化する利得等化器において、
磁気光学効果を利用して、透過率の波長特性を変化させることが可能であり、かつ、各々の透過率の波長特性が互いに異なるように設定された複数の可変光学フィルタと、
該複数の可変光学フィルタを透過したWDM信号光の光パワーの波長特性を検出し、該検出結果に基づいて各波長間の光パワー偏差が抑圧されるように、前記各可変光学フィルタの透過率の波長特性をそれぞれ制御する制御手段と、
を備えて構成されたことを特徴とする利得等化器。

【請求項2】 請求項1に記載の利得等化器であって、
前記複数の可変光学フィルタは、透過する光から直線偏光を切り出す第1および第2の偏光子と、該第1および第2の偏光子の間に設けられ、透過する直交2偏光成分間に位相差を与える複屈折素子と、前記第1および第2の偏光子の間に設けられ、透過する偏光に可変のファラデー回転角を与えるファラデー回転子と、をそれぞれ備えたことを特徴とする利得等化器。

【請求項3】 請求項1に記載の利得等化器であって、
前記可変光学フィルタが n 個（ n は2以上の整数）設けられるとき、 k 番目（ k は1から n までの整数）の可変光学フィルタの透過率の波長特性が、前記WDM信号光の帯域内について（ $k-1$ ）個の極値点が存在するように予め設定されていることを特徴とする利得等化器。

【請求項4】 請求項1に記載の利得等化器であって、
前記制御手段は、前記複数の可変光学フィルタを透過したWDM信号光について、前記各可変光学フィルタにそれぞれ対応させて予め設定された少なくとも2つのモニタ波長帯の光信号を抽出する光フィルタ部と、該光フィルタ部で抽出された各モニタ波長帯の光信号パワーを検出するパワー検出部と、該パワー検出部の検出結果を基に、前記各可変光学フィルタに対応した光パワー偏差をそれぞれ求め、該光パワー偏差が抑圧されるように該当する可変光学フィルタの透過率の波長特性を制御するための制御信号を生成する演算部と、を備え、該演算部で生成された制御信号に従って前記各可変光学フィルタの波長特性がフィードバック制御されることを特徴とする利得等化器。

【請求項5】 請求項4に記載の利得等化器であって、
前記光フィルタ部は、奇数番目の可変光学フィルタに対応させて予め設定された少なくとも2つのモニタ波長帯の各中心波長が、前記WDM信号光の帯域内について当該可変光学フィルタの透過率の可変量が極大となる2つの波長を含み、偶数番目の可変光学フィルタに対応させて予め設定された少なくとも2つのモニタ波長帯の各中心波長が、前記WDM信号光の帯域内について当該可変光学フィルタの透過率の可変量が最大になる波長と最小

になる波長とを含むことを特徴とする利得等化器。

【請求項6】 請求項4に記載の利得等化器であって、
前記演算部は、前記各可変光学フィルタに対応したフィードバック制御の各々の時定数が互いに異なるように設定されていることを特徴とする利得等化器。

【請求項7】 請求項1に記載の利得等化器であって、
前記複数の可変光学フィルタの挿入損失を補償するための光増幅手段を備えたことを特徴とする利得等化器

【請求項8】 請求項1に記載の利得等化器であって、
前記複数の可変光学フィルタを透過したWDM信号光のトータルパワーを一定に制御する出力光パワー制御手段を備えたことを特徴とする利得等化器。

【請求項9】 請求項1に記載の利得等化器であって、
前記WDM信号光が複数の波長帯域の信号光を含むとき、該WDM信号光を各波長帯域の信号光に分波する分波手段を設けると共に、該分波手段で分波された各波長帯域の信号光に対応させて、前記複数の可変光学フィルタおよび前記制御手段をそれぞれ設け、さらに、前記複数の可変光学フィルタを透過した各波長帯域のWDM信号光を合波する合波手段を設けたことを特徴とする利得等化器。

【請求項10】 請求項1に記載の利得等化器と、WDM信号光を増幅する光増幅手段と、を備え、該光増幅手段の利得波長特性の変化が、前記利得等化器によって補償される構成としたことを特徴とする光増幅器。

【請求項11】 請求項10に記載の光増幅器であって、
前記光増幅手段が、希土類元素ドープ光ファイバ増幅器を含むことを特徴とする光増幅器。

【請求項12】 請求項10に記載の光増幅器であって、
前記光増幅手段が、ラマン増幅器を含むことを特徴とする光増幅器。

【請求項13】 WDM信号光を生成して伝送路に送信する光送信機と、前記伝送路を介して伝送されたWDM信号光を受信する光受信機と、前記伝送路の途中に所定の中継間隔で配置される複数の光増幅器と、を備えたWDM光伝送システムにおいて、
請求項1に記載の利得等化器が、複数の中継区間を含んだ所定の補償区間ごとに配置され、該補償区間内にある複数の光増幅器の利得波長特性の変化が、前記利得等化器によって補償されることを特徴とするWDM光伝送システム。

【請求項14】 請求項13に記載のWDM光伝送システムであって、
前記利得等化器の複数の可変光学フィルタが、前記補償区間内のいずれか1つの中継区間の終端にまとめて配置されたことを特徴とするWDM光伝送システム。

【請求項15】 請求項13に記載のWDM光伝送システムであって、
前記利得等化器の複数の可変光学フィルタが、前記補償区間内の異なる中継区間の各終端に分散させて配置され

たことを特徴とするWDM光伝送システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、磁気光学効果を利用した可変光学フィルタを用いて、WDM信号光の光パワーの波長特性を等化する補償技術に関し、特に、波長特性の直線（1次）的な傾斜だけでなく高次のリップルまでを動的に補償できるようにした利得等化器、並びに、それを用いた光増幅器およびWDM光伝送システムに関する。

【0002】

【従来の技術】近年、光伝送システムの大容量化を実現する方法のひとつとして、1つの伝送路に波長の異なる2つ以上の光信号を多重して伝送する波長多重（WDM）光伝送方式が注目されている。また、WDM光伝送方式と光増幅中継伝送方式を組み合わせたWDM光増幅中継伝送方式においては、光増幅器（光中継器）を用いることによって、波長多重された光信号を一括して増幅することが可能であり、簡素な構成（経済的）で、大容量かつ長距離伝送が実現可能である。

【0003】上記のようなWDM光増幅中継伝送方式では、伝送路の損失波長特性や光増幅器の利得波長特性などによって、WDM信号光のパワーに波長依存性が発生し、伝送特性を劣化させてしまうことが知られている。このようなWDM信号光の波長依存性に対処するため、例えば、光増幅器の利得波長特性を個別に補償する固定型利得等化器を設けると共に、光送信機側において各波長の光信号パワーに偏差を持たせる、いわゆるプリエンファシスを施すなどの技術が提案されている。このような技術を適用することによって、光受信機側における各波長の光信号パワーの偏差が比較的小さくなり、各波長間の光SNR（信号対雑音比）がほぼ同じ程度になって、伝送特性の劣化が抑えられるようになる。

【0004】ところで、上記のような光パワーの波長依存性を補償する技術では、設計段階において、各種の設定条件が最適になるようにされているため、光伝送サービスが開始された時点では最適な補償が行われるが、時間が経過するにつれて十分な補償ができなくなってしまう場合がある。例えば、光増幅器の利得波長特性は、動作点または温度等の変動によって変化する。このため、当初設計していた補償条件では、各波長の光信号パワー間に偏差が生じてしまう。したがって、伝送後の各波長光間における光SNRの偏差は、光送信機側のプリエンファシスでは救済できなくなって、一部の波長光について、符号誤り率等の受信特性が必要とされる値を割ってしまうという問題が生じる。

【0005】ここで、光増幅器の動作点変動による利得波長特性の変化について具体的に説明しておく。一般に、光伝送システムにおける伝送路の区間損失は、割り入れや経時劣化などによって増大するので、光増幅器に

入力されるWDM信号光のパワーは低下する傾向にある。このため、伝送路へのトータルの出力光パワーが一定になるような光出力一定制御（ALC）の下で動作する光増幅器では、入力光パワーの低下に伴って、動作点が当初設計していたものからずれてしまうようになる。

【0006】例えば、従来の1.55 μ mの信号光帯域（以下、Cバンドと呼ぶ）では、図18に示すように、区間損失の増大に伴って、ALC動作するエルビウムドープ光ファイバ増幅器（EDFA）の利得が約1dB増大すると、波長に対する利得傾斜（ゲインチルト）が約-0.012~-0.015dB/nm程度変化するようになる。これは符号を考慮した別の表現に換言すると、EDFAの入力光パワーが約1dB低下したとき、12nmの信号光帯域では、短波長側の利得が長波長側の利得に比べて相対的に約0.2dBだけ上昇することになる。このような現象を以下では「利得傾斜の入力依存性」と呼ぶことにする。

【0007】上記のような利得傾斜の入力依存性による影響は、25年以上の製品寿命が求められる海底WDM光増幅中継伝送システムの場合などに特に重要であり、設計の際に必ず考慮しなければならない。なぜなら、割り入れや経時劣化等によって、25年間に区間損失が増大する可能性が高いためである。

【0008】さらに、最近ではWDM光増幅中継伝送システムの伝送容量の増大に伴って、信号光帯域の拡大が要求されており、1.58 μ m帯（以下、Lバンドと呼ぶ）の信号光帯域が次の信号光帯域として注目されている。例えば、Lバンドに増幅帯域を有するEDFA等の公知の光増幅器の場合、その利得傾斜の入力依存性は、前述の図18に示したCバンドの場合のように比較的直線に近い状態で変化するのではなく、例えば図19に示すように2次曲線的に変化する。海底WDM光増幅中継伝送システムのように中継区間数の多い長距離の光伝送の場合には、伝送後の各波長の光信号に対して累積された光SNRの偏差を均一にするため、上記のような2次曲線的に変化する利得傾斜の入力依存性を伝送路の途中等で補償する技術が必要となる。

【0009】上記のように動作点や温度等の変動によって生じる利得波長特性の2次曲線的な変化までを動的に補償する従来技術としては、例えば、John W. Arkwright et al., "Custom designed gain-flattening filters with highly reproducible spectral characteristics", OAA'99, pp.207-210, 1999.や、S. P. Parry et al., "Dynamic gain equalization of EDFAs with Fourier Filters", OAA'99, pp.221-224, 1999.などにおいて、周期の異なるマッハツェンダ（Mach-Zehnder: MZ）型光フィルタを組み合わせる技術が提案されている。

【0010】この従来技術における基本的な概念は、波長に対する周期（別の表現では、自由スペクトル領域

(Free Spectral Range: FSR) の異なる光フィルタを組み合わせて、その損失波長特性を所望の利得波長特性にマッチングさせることにより高次のリップルまでを補償する、いわゆるフーリエ展開による補償技術である。このような従来技術で用いられる光フィルタとしては、バルク型または導波路型の光フィルタが利用されている。

【0011】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上記のような従来の補償技術では、バルク型の光フィルタを用いる場合、メカニカルな動作によって透過（損失）波長特性を可変にしているため、振動などに弱く信頼度が低いという問題点があった。また、導波路型の光フィルタを用いる場合には、挿入損失が大きい、コストが高い、消費電力が比較的高いなどの欠点があり、現状では、伝送路上の利得等化器としての搭載は困難であった。

【0012】さらに、複数の光フィルタを組み合わせて、直線的な補償（以下、1次補償と呼ぶ）だけでなく2次曲線的な補償（以下、2次補償と呼ぶ）までを動的に行うためには、動作点変動等によって生じる利得波長特性の変化に応じて、各光フィルタの透過（損失）波長特性を高い精度で制御することが必要になる。このような制御は、組み合わせられる光フィルタの数が増えたり、より高次の補償が求められるようになるほど複雑なものとなるため、効果的で精度の高い制御技術が求められている。

【0013】加えて、より低雑音で広帯域なラマン増幅器が将来的に実用化された際にも、上記のような利得波長特性の変化を補償する技術が重要になるであろう。すなわち、EDFAに代えて若しくはEDFAとの組み合わせで用いられるラマン増幅器についても、動作点や温度が変動することで利得波長特性が変化すると考えられるため、その変化を動的に補償して伝送特性の劣化を防止することが必要になるものと考えられる。

【0014】本発明は上記の点に着目してなされたもので、WDM信号光の光パワーの波長特性について、直線的な傾斜だけでなく高次のリップルまでを動的に高い精度で補償でき、かつ、高い信頼度を備えた利得等化器、並びに、それを用いた光増幅器およびWDM光伝送システムを提供することを目的とする。

【0015】

【課題を解決するための手段】上記の目的を達成するため本発明による利得等化器は、WDM信号光の光パワーの波長特性を等化する利得等化器において、磁気光学効果を利用して、透過率の波長特性を変化させることが可能であり、かつ、各々の透過率の波長特性が互いに異なるように設定された複数の可変光学フィルタと、該複数の可変光学フィルタを透過したWDM信号光の光パワーの波長特性を検出し、該検出結果に基づいて各波長間の光パワー偏差が抑圧されるように、前記各可変光学フィ

ルタの透過率の波長特性をそれぞれ制御する制御手段と、を備えて構成されるものである。

【0016】かかる構成の利得等化器では、各波長間の光パワーに偏差が生じたWDM信号光が入力されると、該WDM信号光が複数の可変光学フィルタに順次送られる。各可変光学フィルタは、透過率の波長特性が互いに異なるように設定されており、各々の透過波長特性に従ってWDM信号光が透過されることで、WDM信号光の光パワー偏差が補償される。さらに、複数の可変光学フィルタを透過したWDM信号光は、その光パワーの波長特性が制御手段において検出され、残留した各波長間の光パワー偏差が求められる。各可変光学フィルタは、磁気光学効果を利用して透過波長特性を変えることができるので、残留した各波長間の光パワー偏差が抑圧されるように各々の透過波長特性が制御手段によってフィードバック制御される。これにより、WDM信号光に生じた光パワーの波長特性に対する動的な補償を高い精度で行うことが可能になる。また、各可変光学フィルタがメカニカルな動作なしに透過波長特性を可変制御することが可能であるため、信頼度の高い利得等化器を実現できる。

【0017】上記の利得等化器に用いられる複数の可変光学フィルタの具体的な構成としては、透過する光から直線偏光を切り出す第1および第2の偏光子と、該第1および第2の偏光子の間に設けられ、透過する直交2偏光成分間に位相差を与える複屈折素子と、第1および第2の偏光子の間に設けられ、透過する偏光に可変のファラデー回転角を与えるファラデー回転子と、をそれぞれ備えるようにしてもよい。

【0018】かかる構成の各可変光学フィルタでは、複屈折素子について、光の透過方向の厚さ、常光線および異常光線の屈折率差を適宜に設定することで、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状を波長の軸の方向に任意に設定することが可能であり、また、複屈折素子の光学軸に対する各偏光子の透過軸のなす角度やファラデー回転角を適宜に設定することで、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状を透過率の軸の方向に任意に変えることが可能である。

【0019】また、上記の利得等化器について、可変光学フィルタが n 個（ n は2以上の整数）設けられるときには、 k 番目（ k は1から n までの整数）の可変光学フィルタの透過率の波長特性が、前記WDM信号光の帯域内について（ $k-1$ ）個の極値点が存在するように予め設定されるようにするのが好ましい。このように設定することで、1番目の可変光学フィルタが直線（1次）的な透過波長特性となり、2番目の可変光学フィルタが2次曲線的な透過波長特性となり、 n 番目の可変光学フィルタが n 次曲線的な透過波長特性となる。これにより、 n 個の可変光学フィルタによって1次から n 次までの補償が行われるようになる。

【0020】さらに、上記利得等化器の制御手段に関する具体的な構成としては、複数の可変光学フィルタを透過したWDM信号光について、各可変光学フィルタにそれぞれ対応させて予め設定された少なくとも2つのモニタ波長帯の光信号を抽出する光フィルタ部と、該光フィルタ部で抽出された各モニタ波長帯の光信号パワーを検出するパワー検出部と、該パワー検出部の検出結果を基に、各可変光学フィルタに対応した光パワー偏差をそれぞれ求め、該光パワー偏差が抑圧されるように該当する可変光学フィルタの透過率の波長特性を制御するための制御信号を生成する演算部と、を備え、該演算部で生成された制御信号に従って各可変光学フィルタの波長特性がフィードバック制御されるようにしてもよい。

【0021】かかる構成の制御手段では、各可変光学フィルタについて、各々に対応したモニタ波長帯に該当する光信号パワーが検出され、該検出結果を基に求めた光パワー偏差に応じて、該当する可変光学フィルタの透過波長特性のフィードバック制御が実施されるようになる。

【0022】加えて、上記の光フィルタ部の具体的な設定としては、奇数番目の可変光学フィルタに対応させて予め設定された少なくとも2つのモニタ波長帯の各中心波長が、WDM信号光の帯域内について当該可変光学フィルタの透過率の可変量が極大となる2つの波長を含み、偶数番目の可変光学フィルタに対応させて予め設定された少なくとも2つのモニタ波長帯の各中心波長が、WDM信号光の帯域内について当該可変光学フィルタの透過率の可変量が最大になる波長と最小になる波長とを含むようにするのが望ましい。これにより、各可変光学フィルタに対応した光パワー偏差が高い精度で求められるようになり、効果的なフィードバック制御を実現できる。

【0023】また、上記制御手段の演算部については、各可変光学フィルタに対応したフィードバック制御の各々の時定数を互いに異なるように設定するのが好ましい。このような設定とすることで、各々のフィードバック制御が発振することを防止できる。

【0024】上述した利得等化器については、複数の可変光学フィルタの挿入損失を補償するための光増幅手段を備えるようにしてもよい。これにより、挿入損失のない利得等化器が実現される。

【0025】また、上述した利得等化器については、複数の可変光学フィルタを透過したWDM信号光のトータルパワーを一定に制御する出力光パワー制御手段を備えるようにしてもよい。これにより、トータルパワーが一定に制御されたWDM信号光が利得等化器から出力されるようになる。

【0026】さらに、上述した利得等化器について、WDM信号光が複数の波長帯域の信号光を含む場合には、該WDM信号光を各波長帯域の信号光に分波する分波手

段を設けると共に、該分波手段で分波された各波長帯域の信号光に対応させて、複数の可変光学フィルタおよび制御手段をそれぞれ設け、さらに、複数の可変光学フィルタを透過した各波長帯域のWDM信号光を合波する合波手段を設けるようにしてもよい。これにより、例えば、CバンドおよびLバンドの各信号光が一括して伝送されるようなときでも、本発明による利得等化器を適用することが可能になる。

【0027】本発明による光増幅器は、上述したような利得等化器と、WDM信号光を増幅する光増幅手段と、を備え、該光増幅手段の利得波長特性の変化が、利得等化器によって補償される構成としたものである。かかる構成の光増幅器では、動作点や温度等の変動により発生する利得波長特性の変化が自動的に補償されるようになる。

【0028】本発明によるWDM光伝送システムは、WDM信号光を生成して伝送路に送信する光送信機と、前記伝送路を介して伝送されたWDM信号光を受信する光受信機と、前記伝送路の途中に所定の中継間隔で配置される複数の光増幅器と、を備えたWDM光伝送システムにおいて、上述したような本発明による利得等化器が、複数の中継区間を含んだ所定の補償区間ごとに配置され、該補償区間内にある複数の光増幅器の利得波長特性の変化が、前記利得等化器によって補償されるようにしたものである。

【0029】かかる構成のWDM光伝送システムでは、補償区間内にある光増幅器の利得波長特性の変化が補償区間ごとに動的に補償されるようになるため、各波長間の光パワー偏差の小さい信号光を光受信機で受信できる。これにより、広帯域のWDM信号光を長距離にわたって安定して伝送できるため、WDM光伝送システムの伝送容量および伝送距離の拡大を図ることが可能になる。

【0030】また、上記のWDM光伝送システムについては、利得等化器の複数の可変光学フィルタを、補償区間内のいずれか1つの中継区間の終端にまとめて配置してもよく、あるいは、補償区間内の異なる中継区間の各終端に分散させて配置しても構わない。

【0031】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施形態を図面に基づいて説明する。図1は、本発明による利得等化器の第1実施形態についての構成を示すブロック図である。

【0032】図1において、本利得等化器1は、入力端子INと出力端子OUTの間に直列に接続された2つの可変光学フィルタ10₁、10₂と、後段の可変光学フィルタ10₂からの出力光の一部を分岐する光カプラ11と、該光カプラ11からの分岐光に基づいて、各可変光学フィルタ10₁、10₂の透過（損失）波長特性を制御する制御手段としての制御部12とを有する。

【0033】各可変光学フィルタ10₁、10₂は、磁気

光学効果を利用した公知の光学フィルタであって、後述するように各々の透過波長特性が互いに異なるように設定されている。磁気光学効果を利用した可変光学フィルタとしては、例えば、本出願人の先願である、特開平11-212044号公報や特開2000-66137号公報等に記載された技術を利用するのが好適である。

【0034】図2は、可変光学フィルタの好ましい構成例を示した図である。この構成例は、可変光学フィルタ10₁、10₂に共通するものである。なお、本発明に用いられる可変光学フィルタの構成はこれに限られるものではなく、前述の公報等に記載された各種の構成を適用することが可能である。

【0035】図2の構成例では、入力側レンズ10A、入力側くさび板10B、複屈折板（複屈折素子）10C、可変ファラデー回転子10D、出力側くさび板10Eおよび出力側レンズ10Fが、透過光の光路OP上にこの順に配置される。

【0036】入力側レンズ10Aは、入力側の光ファイバ等から出射される光をコリメートして入力側くさび板10Bに供給するためのレンズである。また、出力側レンズ10Fは、出力側くさび板10Eからのビームを集光して出力側の光ファイバ等に結合するためのレンズである。

【0037】入力側くさび板10Bは、複屈折物質からなり、光学軸Piを有し、第1の偏光子として機能する。また、出力側くさび板10Eも、複屈折物質からなり、光学軸Poを有し、第2の偏光子として機能する。ここでは、入力側くさび板10Bの頂部および底部がそれぞれ出力側くさび板10Eの底部および頂部に対向し、かつ、対応する面同士が互いに平行になるように配置されている。なお、偏光子としての各くさび板10B、10Eの透過軸（透過する偏光の偏光軸を決定するもの）は、偏光面が光学軸に平行な異常光線の偏光方向あるいは偏光面が光学軸に垂直な常光線の偏光方向として定義される。

【0038】複屈折板10Cは、透過する直交2偏光成分間に位相差を与えるためのものであって、該位相差を決定する光学軸C1を有する。ここでは、複屈折板10Cの光路OP方向の厚さをdとし、複屈折板10Cにおける常光線および異常光線の屈折率差をμとする。また、複屈折板10Cの光学軸C1と入力側くさび板10Bの光学軸Piとがなす角度をφとし、複屈折板10Cの光学軸C1と出力側くさび板10Eの光学軸Poとがなす角度をθとする。

【0039】可変ファラデー回転子10Dは、透過する偏光に可変のファラデー回転を与えるものである。一般にファラデー回転は、磁気光学結晶にある磁界（磁場）を印加した状態で、つまり磁気光学結晶をある磁界の中においた状態で、例えば直線偏光が磁気光学結晶内を通過すると、その偏光方向が直線偏光の伝搬方向に係わら

ず常に一定の方向に回転する現象である。偏光方向の回転角の大きさ（ファラデー回転角 θ_F ）は、印加磁界により生じた磁気光学結晶の磁化の方向および強さに依存する。このような可変ファラデー回転子10Dの具体的な構成および動作は、上述した特開平11-212044号公報等で詳しく説明されているので、ここではその概要についてのみ簡単に説明することにする。

【0040】図3は、可変ファラデー回転子10Dの具体的な構成の一例を示す斜視図である。なお、本発明に用いられる可変ファラデー回転子の構成は、これに限定されるものではない。

【0041】図3の構成例において、可変ファラデー回転子10Dは、磁気光学結晶41と、磁気光学結晶41に対して互いに直交する方向に磁界を印加する永久磁石42および電磁石43と、電磁石43に駆動電流を与える可変電流源44と有する。このような構成では、電磁石43に与える駆動電流を調整することで、永久磁石42および電磁石43により磁気光学結晶41に印加される合成磁界の方向および強さが変化し、ファラデー回転角 θ_F が可変制御されるようになる。

【0042】制御部12（図1参照）は、例えば、光カプラ20A、20Bと、光フィルタ部としての光フィルタ21A、21B、21Cと、パワー検出部としての受光素子（PD）22A、22B、22Cと、演算部としての演算回路23₁、23₂とを有する。光カプラ20Aは、光カプラ11で分岐された光を2分岐して、一方の分岐光を光フィルタ21Aに送り、他方の分岐光を光カプラ20Bに送る。光カプラ20Bは、光カプラ20Aからの分岐光をさらに2分岐して、一方の分岐光を光フィルタ21Bに送り、他方の分岐光を光フィルタ21Cに送る。各光フィルタ21A～21Cは、それぞれ、所要の帯域（モニタ波長帯）の光のみを通過させる光フィルタである。ここでは、各光フィルタ21A～21Cの通過帯域の中心波長を λ_{CA} 、 λ_{CB} 、 λ_{CC} とする。なお、各光フィルタ21A～21Cの中心波長 λ_{CA} 、 λ_{CB} 、 λ_{CC} の設定については後述する。各受光素子22A、22B、22Cは、対応する各光フィルタ21A～21Cを通過した光を電気信号に変換して出力する。演算回路23₁は、一方の入力端子に受光素子22Aからの出力信号が入力され、他方の入力端子には受光素子22Cからの出力信号が入力されて、各出力信号のレベル差に応じた制御信号を生成し、該制御信号を可変光学フィルタ10₁にフィードバックする。演算回路23₂は、一方の入力端子に受光素子22Aからの出力信号が入力され、他方の入力端子には受光素子22Bからの出力信号が入力されて、各出力信号のレベル差に応じた制御信号を生成し、該制御信号を可変光学フィルタ10₂にフィードバックする。なお、演算回路23₁を含むフィードバックループの時定数 T_{F1} および演算回路23₂を含むフィードバックループの時定数 T_{F2} は、各演算回路内に設けら

れたコンデンサの容量等に応じて設定されていて、ここでは、時定数 T_{F1} が時定数 T_{F2} よりも短くなるように($T_{F1} < T_{F2}$)設定されている。

【0043】次に、各可変光学フィルタ 10_1 、 10_2 の具体的な設定を説明する。まず、上述の図2に示したような可変光学フィルタの基本的な特性について考える。ここでは説明を分かり易くするために、図2の構成について可変ファラデー回転子 $10D$ を省略した場合の定量的な解析を行い、それを発展させる形で可変ファラデー回転子 $10D$ を設けた可変光学フィルタの特性を説明することにする。

【0044】入力側くさび板 $10B$ の光学軸 P_i に平行に、直線偏光 $\sin(\omega t)$ が入射した時、複屈折板 $10C$ を通過した光の光学軸 C_1 に平行な成分 E_1 と、光学

$$\begin{aligned} E_1 \sin \theta + E_2 \cos \theta &= \sin \phi \sin(\omega t + \epsilon_1) \\ &\quad + \cos \phi \cos \theta \sin(\omega t + \epsilon_2) \\ &= (\sin \phi \sin \theta \cos \epsilon_1 + \cos \phi \cos \theta \cos \epsilon_2) \sin \omega t \\ &\quad + (\sin \phi \sin \theta \sin \epsilon_1 + \cos \phi \cos \theta \sin \epsilon_2) \cos \omega t \quad \dots (2) \end{aligned}$$

したがって、上記のような可変光学フィルタから出力される透過光の強度 I は、次の(3)式で表すことができる

$$\begin{aligned} I &= \cos^2(\phi + \theta) \\ &\quad + \sin(2\phi) \sin(2\theta) \cos^2((\epsilon_1 - \epsilon_2)/2) \quad \dots (3) \end{aligned}$$

ここで、上記(3)式の第2項における $(\epsilon_1 - \epsilon_2)/2$ は、光の波長を λ として、複屈折板 $10C$ の厚み d および複屈折板 $10C$ における常光線および異常光線の屈折率差 μ を用いると、次の(4)式に示す関係が成り立つ。

【0047】

$$\begin{aligned} I(\lambda) &= \cos^2(\phi + \theta) \\ &\quad + \sin(2\phi) \sin(2\theta) \cos^2(\mu d / \lambda) \quad \dots (5) \end{aligned}$$

上記(5)式により、透過光の強度(透過率)は、波長依存性を持ち、波長に対して周期的に変化することが分かる。ここで、実際に使用する波長光帯域の幅に比べて、波長の値が大きいと、 $1/\lambda$ は、一次関数 $1/\lambda = a\lambda + b$ で近似することができる(a 、 b は定数)。さ

$$\begin{aligned} I(I) &= \cos^2(\phi + \theta) \\ &\quad + \sin(2\phi) \sin(2\theta) \cos^2(\pi \lambda / \text{FSR}) \quad \dots (6) \end{aligned}$$

ここで、FSRは、透過率の波長特性における波長周期を表し、次の(7)式で与えられる。

【0050】 $\text{FSR} = 1/a\mu d \quad \dots (7)$

したがって、所要のFSRを得るためには、例えば、複屈折板 $10C$ の材料によって決定される屈折率差 μ が一定であるとする、複屈折板 $10C$ の厚み d を調整すればよいことが分かる。

【0051】また、(5)式により、角度 ϕ および角度 θ の少なくとも一方を変化させると、透過光強度も変化することが分かる。角度 θ は、出力側くさび板の $10E$ の光学軸 P_o が複屈折板 $10C$ の光学軸 C_1 となす角度であり、出力側くさび板 $10E$ に入射される光の偏光軸と出力側くさび板の $10E$ の光学軸 P_o とがなす角度で

軸 C_1 に垂直な成分 E_2 とは、両成分の位相遅れをそれぞれ ϵ_1 及び ϵ_2 とすると、次の(1)式でそれぞれ表すことができる。

【0045】

$$\begin{aligned} E_1 &= \sin \phi \sin(\omega t + \epsilon_1) \\ E_2 &= \cos \phi \sin(\omega t + \epsilon_2) \quad \dots (1) \end{aligned}$$

これら2つの成分 E_1 、 E_2 は、複屈折板 $10C$ の出力において合成された後に出力側くさび板 $10E$ を通過する。この出力側くさび板 $10E$ を通過した光の光学軸 P_o に平行な成分の振幅($E_1 \sin \theta + E_2 \cos \theta$)は、上記(1)式を用いて、次の(2)式で表すことができる。

【0046】

$$(\epsilon_1 - \epsilon_2)/2 = \pi \mu d / \lambda \quad \dots (4)$$

したがって、上記(3)式および(4)式より、透過光の強度 I は波長 λ の関数 $I(\lambda)$ として、次の(5)式で表すことができる。

【0048】

らに、 b を無視して相対波長のみを考えると、透過光の強度 $I(\lambda)$ は、次の(6)式のように表すことができる。

【0049】

あるということもできる。したがって、可変ファラデー回転子 $10D$ によって出力側くさび板 $10E$ に入射される偏光の方位角を回転すれば、角 θ が変化したのと同じ状態を実現することができ、その回転に応じて透過光強度を変化させることが可能である。

【0052】なお、ここでは、複屈折板 $10C$ と出力側くさび板 $10E$ の間に可変ファラデー回転子 $10D$ を配置して角度 θ を変化させるようにしているが、これ以外にも例えば、可変ファラデー回転子 $10C$ を入力側くさび板 $10B$ と複屈折板 $10C$ の間に配置し、複屈折板 $10C$ に入射される偏光の方位角を回転すれば、角 ϕ が変化したのと同じ状態を実現することができ、その回転に応じて透過光強度を変化させることも可能である。

【0053】上述したように、図2に示したような構成の可変光学フィルタは、複屈折板10Cの厚さ d および屈折率差 μ を適宜に設定することによって、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状を波長の軸の方向に任意に設定することが可能である。具体的には、図4(A)に例示するように、透過率が最小となるピーク波長を波長の軸の方向に変化させたり、図4(B)に例示するように、FSRを変化させることができる。なお、図4(B)の例では、厚さ d を一定にした状態で屈折率差 μ を変化させているため、透過率の軸方向にも変化が生じている。しかし、これは複屈折板10Cの厚さ d を適宜に変更すれば一定にすることが可能である。

【0054】また、複屈折板10Cの光学軸C1に対するくさび板10B、10Eの各光学軸P_i、P_oの配置と、可変ファラデー回転子10Dの駆動電流とを適宜に設定することで、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状を透過率の軸の方向に任意に変えることが可能である。

【0055】次に、各可変光学フィルタ10₁、10₂の透過波長特性の個別の設定について具体的に説明する。図5は、可変光学フィルタ10₁の透過波長特性の設定例を示す図である。なお、図中の各曲線は、ファラデー回転角 θ_F を10°～80°の範囲で変化させたときの各透過率をそれぞれ表している。

【0056】図5に示すように、可変光学フィルタ10₁の透過波長特性は、所要の信号光帯域 $\Delta\lambda$ （例えば、CバンドやLバンド等）において透過率が直線的に変化するように、複屈折板10Cの厚さ d 、屈折率差 μ 等が設定されている。図5に示した設定例では、ファラデー回転角 θ_F の変化に対して、信号光帯域 $\Delta\lambda$ の両端で透過率の変化がそれぞれ最大となり、信号光帯域 $\Delta\lambda$ の中央部で透過率の変化が最小となる。具体的には、ファラデー回転角が小さくなると、透過率が単調減少し、ファラデー回転角 θ_F が大きくなると、透過率が単調増加するような波長特性となっている。このような透過波長特性を実現する設計値の一例としては、Lバンドについて、複屈折板10Cの厚さ $d=0.001666\text{ m}$ 、屈折率差 $\mu=0.015$ 、角度 $\phi=45^\circ$ などを挙げることができる。このような波長特性を有する可変光学フィルタ10₁では、制御部12の演算回路23₁から送られてくる制御信号に従ってファラデー回転角 θ_F がフィードバック制御されることにより、直線的に変化する透過波長特性の傾きが1次補償に適した値となるように自動調整される。

【0057】図6は、可変光学フィルタ10₂の透過波長特性の設定例を示す図である。なお、図中の各曲線は、図5の場合と同様に、ファラデー回転角 θ_F を10°～80°の範囲で変化させたときの各透過率をそれぞれ表している。

【0058】図6に示すように、可変光学フィルタ10

₂の透過波長特性は、所要の信号光帯域 $\Delta\lambda$ （例えば、CバンドやLバンド等）において透過率が2次曲線的に変化するように、複屈折板10Cの厚さ d 、屈折率差 μ 等が設定されている。ここでいう透過率の2次曲線的な変化とは、所要の信号光帯域 $\Delta\lambda$ について極値点が1つ存在するような変化である。なお、前述した透過率の直線（1次）的な変化は、極値点が存在しない場合に相当する。図6に示した設定例では、ファラデー回転角 θ_F の変化に対して、信号光帯域 $\Delta\lambda$ の中央部で透過率の変化が最大（極大値または極小値）となり、信号光帯域 $\Delta\lambda$ の両端で透過率の変化がそれぞれ最小となる。具体的には、ファラデー回転角が小さくなると、透過率が上に凸の2次曲線的に変化し、ファラデー回転角 θ_F が大きくなると、透過率が下に凸の2次曲線的に変化するような波長特性となっている。このような透過波長特性を実現する設計値の一例としては、Lバンドについて、複屈折板10Cの厚さ $d=0.001664\text{ m}$ 、屈折率差 $\mu=0.015$ 、角度 $\phi=45^\circ$ などを挙げることができる。このような波長特性を有する可変光学フィルタ10₂では、制御部12の演算回路23₂から送られてくる制御信号に従ってファラデー回転角 θ_F がフィードバック制御されることにより、透過波長特性の極値点の深さが2次補償に適した値となるように自動調整される。

【0059】ここで、利得波長特性の変化に対する1次補償および2次補償について、図7～図9を用いて具体的に説明する。例えば、図7に示すように、光増幅器の利得波長特性の変化が実線Iに示すような右下がりな下に凸の曲線を描く場合（例えば、動作点変動によるEDFAの利得波長特性の変化などがこれに相当する）には、1次補償を行う可変光学フィルタ10₁の透過波長特性が、破線I'で示すような単調増加する特性（ただし、縦軸方向は透過率とする）となるように設定する。これにより、1次補償後の利得波長特性の変化は実線IIに示すような下に凸の略2次曲線を描くようになる。さらに、この実線IIに対応させて、2次補償を行う可変光学フィルタ10₂の透過波長特性を、破線II'で示すような上に凸の2次曲線（ただし、縦軸方向は透過率とする）となるように設定する。具体的には、実線IIが最小となる波長 λ_{II} に対応させて、可変光学フィルタ10₂の透過率が最大となるように透過波長特性を設定する。これにより、2次補償後の利得波長特性の変化は理想的には実線IIIに示すような平坦な特性となる。

【0060】また例えば、図8に示すように、光増幅器の利得波長特性の変化が実線Iに示すような右上がりな上に凸の曲線を描く場合（例えば、温度変動によるEDFAの利得波長特性の変化などがこれに相当する）には、1次補償を行う可変光学フィルタ10₁の透過波長特性が、破線I'で示すような単調減少する特性となるように設定することで、1次補償後の利得波長特性の変

化は実線 I I に示すような上に凸の略 2 次曲線を描くようになる。さらに、この実線 I I に対応させて、2 次補償を行う可変光学フィルタ 1 0₂ の透過波長特性を、破線 I I' で示すような下に凸の 2 次曲線となるように設定することで、2 次補償後の利得波長特性の変化は理想的には実線 I I I に示すような平坦な特性となる。

【0061】また例えば、図 9 に示すように、光増幅器の利得波長特性の変化が実線 I に示すような右下がりて下に凸の曲線を描く場合（例えば、動作点変動によるラマン増幅器の利得波長特性の変化などがこれに相当する）には、1 次補償を行う可変光学フィルタ 1 0₁ の透過波長特性が、破線 I' で示すような単調増加する特性となるように設定することで、1 次補償後の利得波長特性の変化は実線 I I に示すような下に凸の略 2 次曲線を描くようになる。さらに、この実線 I I に対応させて、2 次補償を行う可変光学フィルタ 1 0₂ の透過波長特性を、破線 I I' で示すような上に凸の 2 次曲線となるように設定することで、2 次補償後の利得波長特性の変化は実線 I I I に示すような略平坦な特性となる。

【0062】本利得等化器の設計段階では、上記のようにして、伝送路等を介して接続される光増幅器の利得波長特性の変化の傾向に対応させて、各可変光学フィルタ 1 0₁、1 0₂ の設計パラメータを予め設定し、実際の運用段階では、制御部 1 2 からの制御信号に従って各可変光学フィルタ 1 0₁、1 0₂ のファラデー回転角をフィードバック制御することで、動作点変動等による利得波長特性の変化に逐次対応した 1 次補償および 2 次補償が実施されるようになる。

【0063】ここで、制御部 1 2 の制御動作について詳しく説明する。まず、制御部 1 2 でモニタされる信号光について具体的に説明する。本実施形態では、制御部 1 2 内に設けられた 3 つの光フィルタ 2 1 A ~ 2 1 C うちの、光フィルタ 2 1 A、2 1 C で抽出された光を用いて、1 次補償用の可変光学フィルタ 1 0₁ のフィードバック制御が行われ、光フィルタ 2 1 A、2 1 B で抽出された光を用いて、2 次補償用の可変光学フィルタ 1 0₂ のフィードバック制御が行われる。

【0064】可変光学フィルタ 1 0₁ における 1 次補償では、光増幅器の利得波長特性の変化について、直線的な変化の傾きを正確にモニタし、ファラデー回転角 θ_F に応じて変化する可変光学フィルタ 1 0₁ の透過波長特性の傾きをフィードバック制御する必要がある。このためには、例えば、補償後の信号光について信号光帯域 $\Delta\lambda$ の両端における光パワーをそれぞれモニタし、各々の光パワーの差が補償されるように可変光学フィルタ 1 0₁ のファラデー回転角 θ_F を調整するのが効果的である。本実施形態では、上述の図 5 に示したように、光フィルタ 2 1 A の通過帯域の中心波長 λ_{cA} が、信号光帯域 $\Delta\lambda$ の短波長側端部に位置するように設定され、また、光フィルタ 2 1 C の通過帯域の中心波長 λ_{cC} が、信号光帯域

$\Delta\lambda$ の長波長側端部に位置するように設定されている。

【0065】また、可変光学フィルタ 1 0₂ における 2 次補償では、光増幅器の利得波長特性の変化について、2 次曲線的な変化の極値点における深さ（透過率の大きさ）を正確にモニタし、ファラデー回転角 θ_F に応じて変化する可変光学フィルタ 1 0₂ の極値点の深さをフィードバック制御する必要がある。このためには、補償後の信号光について、上述の図 7 ~ 図 9 で示した波長 λ_{II} における光パワーと、信号光帯域 $\Delta\lambda$ の一端における光パワーとをそれぞれモニタし、各々の光パワーの差が補償されるように可変光学フィルタ 1 0₂ のファラデー回転角 θ_F を調整すればよい。本実施形態では、上述の図 6 に示したように、光フィルタ 2 1 B の通過帯域の中心波長 λ_{cB} が、ファラデー回転角 θ_F の変化に対する透過率の変化量が最大となる波長（波長 λ_{II} に相当する）に設定される。また、ここでは信号光帯域 $\Delta\lambda$ の一端における光パワーのモニタ用として光フィルタ 2 1 A を共用する構成としている。ただし、これは別個に設けても構わない。

【0066】上記のように設定された各光フィルタ 2 1 A ~ 2 1 C によってそれぞれ抽出されたモニタ光は、各受光素子 2 2 A ~ 2 2 C により各々の光パワーに対応した電気信号に変換され、演算回路 2 3₁ または演算回路 2 3₂ に送られる。演算回路 2 3₁ では、受光素子 2 2 A、2 2 C からの各出力信号を用いて、信号光帯域 $\Delta\lambda$ の両端における光パワーの偏差が求められる。この偏差は可変光学フィルタ 1 0₁ における 1 次補償の誤差に相当するので、該誤差が減少するように可変光学フィルタ 1 0₁ の透過波長特性の傾きを調整する制御信号が、時定数 T_{F1} に従って演算回路 2 3₁ から可変光学フィルタ 1 0₁ に送られる。また、演算回路 2 3₂ では、受光素子 2 2 A、2 2 B からの各出力信号を用いて、2 次曲線的な変化の極値点における深さが求められる。この極値点における深さは可変光学フィルタ 1 0₂ における 2 次補償の誤差に相当するので、該誤差が減少するように可変光学フィルタ 1 0₂ の極値点の深さを調整する制御信号が、時定数 T_{F2} に従って演算回路 2 3₂ から可変光学フィルタ 1 0₂ に送られる。

【0067】ここでは、1 次補償に対するフィードバックループの時定数 T_{F1} が、2 次補償に対するフィードバックループの時定数 T_{F2} よりも短くなるように設定しておくことで、それぞれのフィードバック制御が発振するの防いでいる。すなわち、各次数のフィードバック制御を同じような時定数で行った場合には、各次数で制御の方向が相反するような状況になったとき、各々のフィードバック制御が収束しなくなる可能性がある。このような状況を回避するためには、例えば、各次数の時定数 T_{F1} 、 T_{F2} を異ならせればよく、また、次数の低い側の時定数 T_{F1} を高い側の時定数 T_{F2} よりも短く設定することで、フィードバック制御がより収束しやすくなる。

【0068】上述したように、本発明による利得等化器の第1実施形態によれば、1次補償の可能な可変光学フィルタ10₁と、2次補償の可能な可変光学フィルタ10₂とを組み合わせるとともに、補償後の信号光のモニタ結果に基づいて各可変光学フィルタ10₁、10₂のファラデー回転角を調整して各々の透過波長特性をフィードバック制御するようにしたことで、動作点変動や温度変動等によって生じる利得波長特性の変化に対する動的な補償を高い精度で行うことができる。また、本利得等化器で用いる可変光学フィルタ10₁、10₂は、メカニカルな動作なしに透過波長特性を可変制御することが可能であるため、振動などにも強く信頼度が高いという利点がある。さらに、1次側のフィードバックループの時定数 T_{F1} を2次側の時定数 T_{F2} よりも短く設定することで、フィードバック制御が収束しやすくなるため、1次補償および2次補償をより安定して行うことが可能である。

【0069】次に、本発明による利得等化器の第2実施形態について説明する。図10は、第2実施形態にかかる利得等化器の構成を示すブロック図である。図10において、本利得等化器1の構成が第1実施形態の構成と異なる点は、3次補償を行う可変光学フィルタ10₃を設けるとともに、制御部12について、可変光学フィルタ10₃をフィードバック制御するための構成を付加した点である。具体的には、光カプラ20C、光フィルタ21D、21E、受光素子(PD)22D、22Eおよび演算回路23₃が制御部12に付設される。

【0070】可変光学フィルタ10₃は、磁気光学効果を利用した公知の光学フィルタであって、後述するように透過波長特性が、他の可変光学フィルタ10₁、10₂とは異なるように設定されている。この可変光学フィルタ10₃の具体的な構成は可変光学フィルタ10₁、10₂と同一であるため(図2および図3参照)、ここでの説明を省略する。

【0071】制御部12の光カプラ20Cは、光カプラ20Aで分岐された光をさらに2分岐して、一方の分岐光を光フィルタ21Dに送り、他方の分岐光を光フィルタ21Eに送る。なお、ここでは光フィルタ11からの分岐光が光フィルタ20Aで3分岐されるものとしている。各光フィルタ21D、21Eは、それぞれ、所要の帯域の光のみを通過させる光フィルタであって、ここでは各々の通過帯域の中心波長を λ_{CD} 、 λ_{CE} とする。なお、各光フィルタ21D、21Eの中心波長 λ_{CD} 、 λ_{CE} の設定については後述する。各受光素子22D、22Eは、対応する各光フィルタ21D、21Eを通過した光を電気信号に変換して出力する。演算回路23₃は、一方の入力端子に受光素子22Dからの出力信号が入力され、他方の入力端子には受光素子22Eからの出力信号が入力されて、各出力信号のレベル差に応じた制御信号を生成し、該制御信号を可変光学フィルタ10₃にフィ

ードバックする。演算回路23₃を含むフィードバックループの時定数 T_{F3} は、演算回路内に設けられたコンデンサの容量等に応じて設定されていて、ここでは、時定数 T_{F3} が時定数 T_{F2} よりも長くなるように($T_{F1} < T_{F2} < T_{F3}$)設定されている。

【0072】次に、可変光学フィルタ10₃の透過波長特性の設定について具体的に説明する。図11は、可変光学フィルタ10₃の透過波長特性の設定例を示す図である。なお、図中の各曲線は、ファラデー回転角 θ_F を $10^\circ \sim 80^\circ$ の範囲で変化させたときの各透過率をそれぞれ表している。

【0073】図11に示すように、可変光学フィルタ10₃の透過波長特性は、所要の信号光帯域 $\Delta\lambda$ において透過率が3次曲線的に変化するように、複屈折板10Cの厚さ d 、屈折率差 μ 等が設定されている。ここでいう透過率の3次曲線的な変化とは、所要の信号光帯域 $\Delta\lambda$ について極値点が2つ存在するような変化である。図11に示した設定例では、ファラデー回転角 θ_F の変化に対して、信号光帯域 $\Delta\lambda$ の両端付近(正確には図中の波長 λ_{CD} および波長 λ_{CE})で透過率の変化がそれぞれ最大となり、信号光帯域 $\Delta\lambda$ の中央部で透過率の変化が最小となる。具体的には、ファラデー回転角が小さくなると、透過率が波長 λ_{CD} で最小、波長 λ_{CE} で最大となり、ファラデー回転角 θ_F が大きくなると、透過率が波長 λ_{CD} で最大、波長 λ_{CE} で最小となる。このような透過波長特性を実現する設計値の一例としては、Lバンドについて、複屈折板10Cの厚さ $d=0.001662\text{m}$ 、屈折率差 $\mu=0.0279$ 、角度 $\phi=45^\circ$ などを挙げることができる。このような波長特性を有する可変光学フィルタ10₃では、制御部12の演算回路23₃から送られてくる制御信号に従ってファラデー回転角 θ_F がフィードバック制御されることにより、透過波長特性が3次補償に適した値となるように自動調整される。

【0074】利得波長特性の変化に対する3次補償は、上述の図7～図9で説明したような1次補償および2次補償だけでは残留してしまう高次のリップル等を補償するために行われる。このような高次の補償は、動作点変動等による光増幅器の利得波長特性変化がシステム上どの程度許容されるかに応じて適宜に行えばよい。

【0075】可変光学フィルタ10₃における3次補償では、光増幅器の利得波長特性の変化について、3次曲線的な変化を正確にモニタし、ファラデー回転角 θ_F に応じて変化する可変光学フィルタ10₃の透過波長特性をフィードバック制御する必要がある。このためには、例えば、補償後の信号光について信号光帯域 $\Delta\lambda$ の両端付近の波長 λ_{CD} 、 λ_{CE} における光パワーをそれぞれモニタし、各々の光パワーの差が補償されるように可変光学フィルタ10₃のファラデー回転角 θ_F を調整するのがよい。本実施形態では、光フィルタ21Dの通過帯域の中心波長 λ_{CD} が、短波長側の極値点に対応する波長となる

ように設定され、また、光フィルタ 21 E の通過帯域の中心波長 λ_{cg} が、長波長側の極値点に対応する波長となるように設定される。

【0076】上記のように設定された各光フィルタ 21 D, 21 E によってそれぞれ抽出されたモニタ光は、各受光素子 22 D, 22 E により各々の光パワーに対応した電気信号に変換され、演算回路 23₃ に送られる。演算回路 23₃ では、受光素子 22 D, 22 E からの各出力信号を用いて、信号光帯域 Δ 入両端の各極値点における光パワーの偏差が求められる。この偏差は可変光学フィルタ 10₃ における 3 次補償の誤差に相当するので、該誤差が減少するように可変光学フィルタ 10₃ の透過波長特性を調整する制御信号が、時定数 T_{F3} に従って演算回路 23₃ から可変光学フィルタ 10₃ に送られる。

【0077】ここでは、3 次補償に対する時定数 T_{F3} が、2 次補償に対する時定数 T_{F2} よりも長くなるように設定しておくことで、第 1 実施形態の場合と同様に各次数のフィードバック制御が発振するの防いでいる。

【0078】上述したように、本発明による利得等化器の第 2 実施形態によれば、3 次補償の可能な可変光学フィルタ 10₃ を付加するとともに、補償後の信号光のモニタ結果に基づいて可変光学フィルタ 10₃ のファラデー回転角を調整して透過波長特性をフィードバック制御する機能を制御部 12 に付加したことで、1 次から 3 次までの補償が実現されるようになるため、利得波長特性の変化に対する動的な補償をより高い精度で行うことができる。

【0079】なお、上述した各実施形態では、2 次または 3 次の補償を実現する構成について説明したが、本発明はこれに限らず、4 次以上の高次補償を実現することも可能である。このことを一般化して書くと、 n 次補償を実現する本発明の利得等化器は、図 12 のブロック図に示すような基本構成となる。すなわち、入力端子 IN と出力端子 OUT の間に、1 次補償から n 次補償までにそれぞれ対応した n 個の可変光学フィルタ 10₁ ~ 10_n を順に接続するとともに、光カプラ 11 で分岐されたモニタ光を用いて、各可変光学フィルタ 10₁ ~ 10_n の透過波長特性をフィードバック制御する制御部 12 を設けることになる。

【0080】この場合、 k 次 ($k=1 \sim n$) の可変光学フィルタ 10_k の透過波長特性は、所要の信号光帯域 Δ 入について透過率の極値点が ($k-1$) 個存在するような特性となる。また、各次数の補償に対するフィードバック制御のモニタ波長は、次数が奇数の場合、ファラデー回転角の変化に対する透過率の変化量が極大になるような 2 つの波長に設定すればよく、また、次数が偶数の場合には、ファラデー回転角の変化に対する透過率の変化量が最大になる波長と、透過率の変化量が最小になる波長に設定すればよい。さらに、各次数のフィードバックループの時定数については、次数の低いものほど短く

なるように設定しておけば、各々のフィードバック制御が収束しやすくなる。

【0081】次に、本発明による利得等化器の第 3 実施形態について説明する。図 13 は、第 3 実施形態にかかる利得等化器の構成を示すブロック図である。図 13 において、本利得等化器は、例えば前述の図 12 に示した n 次補償を行う一般化した構成について、当該利得等化器内で発生する損失を補償するための光増幅手段としての光増幅部 13 を付設したものである。高次の補償を実現するために多くの可変光学フィルタが設けられるようになると、各々の可変光学フィルタが有する挿入損失の影響が問題になる場合が考えられる。このような場合に対処するために、第 3 実施形態では、例えば、入力端子 IN と初段の可変光学フィルタ 10₁ の間に光増幅部 13 を設けて、各可変光学フィルタ 10₁ ~ 10_n で発生する挿入損失を補償するようにしている。

【0082】光増幅部 13 としては、例えば、EDFA やラマン増幅器などの公知の光増幅器を用いることが可能である。この光増幅部 13 における利得は、可変光学フィルタ 10₁ ~ 10_n で発生するトータルの挿入損失と同じか若しくはそれを超えるように予め設定される。

【0083】このように光増幅部 13 を付設することで、実質的に挿入損失の発生しない利得等化器を実現できる。これにより、本利得等化器を様々な光伝送システムに適用することが可能になる。

【0084】なお、第 3 実施形態では、入力端子 IN と初段の可変光学フィルタ 10₁ の間に光増幅部 13 を設けたが、光増幅部 13 の配置はこれに限らず、入力端子 IN と出力端子 OUT の間の任意の位置に光増幅部 13 を設けることが可能である。また、1 段構成の光増幅部 13 としたが、多段構成の光増幅部を本利得等化器内に設けるようにしても構わない。

【0085】次に、本発明による利得等化器の第 4 実施形態について説明する。図 14 は、第 4 実施形態にかかる利得等化器の構成を示すブロック図である。図 14 において、本利得等化器は、例えば上述の第 3 実施形態の構成について、出力端子 OUT を介して外部に出力される信号光のトータルパワーが略一定になるように制御する出力光パワー制御手段としての出力光パワー制御部 14 を、光カプラ 11 と出力端子 OUT の間に設けたものである。

【0086】出力光パワー制御部 14 は、例えば、可変光減衰器 (VATT) 14 A、光カプラ 14 B、受光素子 (PD) 14 C および演算回路 14 D を有する。可変光減衰器 (VATT) 14 A は、外部からの制御信号に従って光減衰量を変化させることのできる公知の光デバイスであって、ここでは、光カプラ 11 を通過した信号光が入射される。光カプラ 14 B は、可変光減衰器 14 A から出力端子 OUT に送られる信号光の一部を分岐して受光素子 14 C に送る。受光素子 14 C は、光カプラ

14Bからの分岐光を電気信号に変換して演算回路14Dに出力する。演算回路14Dは、受光素子14Cからの出力信号レベルと、予め設定された基準レベルとを比較し、出力光パワーが所要の値で一定となるように可変光減衰器14Aの光減衰量を調整する制御信号を生成して、該制御信号を可変光減衰器14Aに出力する。

【0087】かかる構成の利得等化器では、出力光パワー制御部14において、1次～n次の補償が行われた信号光のトータルパワーがモニタされ、該モニタ結果に応じて可変光減衰器14Aの光減衰量がフィードバック制御されることにより、出力端子OUTを介して外部に出力される信号光のトータルパワーが所要の値で一定になる。これにより、本利得等化器に入力される信号光のパワーが変化しても、出力される信号光のパワーを一定にできるため、より安定したWDM信号光の伝送を実現することが可能になる。

【0088】次に、本発明による利得等化器の第5実施形態について説明する。第4実施形態では、例えば、Cバンドの信号光とLバンドの信号光とが一括して伝送されるようなWDM光伝送システムに対応した利得等化器について説明する。

【0089】図15は、第5実施形態にかかる利得等化器の構成を示すブロック図である。図15において、本利得等化器1は、入力端子INに入力されるWDM信号光をCバンドおよびLバンドの各信号光に分波するWDMカプラ15Aと、CバンドおよびLバンドの各信号光を合波して出力端子OUTに送るWDMカプラ15Bと、WDMカプラ15AのCバンド出力端子とWDMカプラ15BのCバンド入力端子との間に配置された、可変光学フィルタ10_{1c}, 10_{2c}, …, 10_{nc}、光カブラ11_cおよび制御部12_cと、WDMカプラ15AのLバンド出力端子とWDMカプラ15BのLバンド入力端子との間に配置された、可変光学フィルタ10_{1L}, 10_{2L}, …, 10_{nL}、光カブラ11_Lおよび制御部12_Lと、を有する。

【0090】なお、Cバンド用の可変光学フィルタ10_{1c}～10_{nc}およびLバンド用の可変光学フィルタ10_{1L}～10_{nL}は、上述した可変光学フィルタ10₁～10_nと同様のものである。また、Cバンド用の光カブラ11_c、制御部12_cおよびLバンド用の光カブラ11_L、制御部12_Lは、上述した光カブラ11、制御部12と同様のものである。

【0091】このような構成の利得等化器1では、CバンドおよびLバンドの各信号光を含んだWDM信号光が入力端子INに入力されると、そのWDM信号光は、WDMカプラ15AでCバンドの信号光とLバンドの信号光とに分波され、各々のバンドごとに、上述した各実施形態の場合と同様にして、利得波長特性の変化に対するn次補償が行われる。そして、各バンドごとにn次補償された各々の信号光は、WDMカプラ15Bで合波された後に、出力端子OUTを介して外部に出力される。こ

れにより、帯域の異なる2つの信号光が一括して伝送されるシステムに対しても、本発明による補償技術を適用することが可能になる。

【0092】なお、上記第5実施形態では、CバンドおよびLバンドの信号光が一括して伝送される場合について考えたが、本発明はこれに限らず、3つ以上の異なる帯域の信号光が一括して伝送されるシステムについても、上記の場合と同様にして各信号光帯域ごとに補償を行うようにすることで対応可能である。

【0093】上述したような第1～第5実施形態の利得等化器は、例えば、希土類元素ドープ光ファイバ増幅器やラマン増幅器等の公知の光増幅器の内部に設けることが可能である。このような本発明による利得等化器を内蔵した光増幅器は、動作点や温度等の変動により発生する利得波長特性の変化を自動的に補償することができる。また、第1～第5実施形態の利得等化器は、一般的なWDM光伝送システムに対して、所要の補償区間ごとに設けることも可能である。このような本発明による利得等化器を配置したWDM光伝送システムでは、所要の補償区間内に設けられた複数の光増幅器（光中継機）で発生する利得波長特性の変化が各補償区間ごとに補償されるようになる。

【0094】以下では、本発明による利得等化器を用いたWDM光伝送システムについて具体的に説明する。図16は、本発明による利得等化器を用いたWDM光伝送システムの構成を示すブロック図である。

【0095】図16のWDM光伝送システムは、例えば、WDM光送信機2と、WDM光受信機3と、それら光送受信機間を接続する伝送路4と、該伝送路4の途中に所要の中継間隔で配置される複数の光増幅器（光中継機）5と、複数の中継区間（図では、例えば3つの光増幅器5を有する区間）を含んだ補償区間1ごとに設けられる利得等化器1と、から構成される。

【0096】WDM光送信機2は、例えば、波長 $\lambda_1 \sim \lambda_N$ の光信号をそれぞれ出力するN個の光送信器（OS）2Aと、波長 $\lambda_1 \sim \lambda_N$ の光信号を波長多重する合波器2Bと、該合波器2BからのWDM信号光を所要のレベルに増幅して伝送路4に出力するポストアンプ2Cと、を有する。

【0097】WDM光受信機3は、例えば、伝送路4を介して伝送されたWDM信号光を所要のレベルに増幅するプリアンプ3Aと、該プリアンプ3Aからの出力光を波長 $\lambda_1 \sim \lambda_N$ の各光信号に分波する分波器3Bと、波長 $\lambda_1 \sim \lambda_N$ の光信号をそれぞれ受信処理するN個の光受信器（OR）3Cと、を有する。

【0098】伝送路4は、WDM光送信機2、各光増幅器5、利得等化器1およびWDM光受信機3の間をそれぞれ接続する。各光増幅器5は、伝送路4を介して送られるWDM信号光を所要のレベルまで増幅して出力する。これらの光増幅器5は、上述したように動作点変動

や温度変動によって利得波長特性が変化する、一般的な公知の光増幅器である。具体的には、希土類元素をドープした光ファイバ増幅器（例えば、EDFA等）や、ラマン増幅を利用したラマン増幅器などとして行うことができる。また、EDFAとラマン増幅器を組み合わせる用い、EDFAの入力光パワーがラマン増幅によって略一定に制御されるような構成を採用した光増幅器5であっても構わない。

【0099】利得等化器1としては、システム上要求される補償精度等に応じて、上述した第1～第5実施形態のいずれかを適宜に選択して用いることができる。例えば、システム上2次までの補償が要求される場合、上述した第1実施形態のような利得等化器1を適用すればよい。また、特定の補償区間Lについては3次までの補償が要求される場合、その補償区間Lに対して上述した第2実施形態のような利得等化器1を適用してもよい。このような場合には、同一のシステム上に補償次数の異なる利得等化器が混在することになる。さらに、利得等化器1における挿入損失の補償が必要な場合には、上述した第3実施形態のような利得等化器1を適用する。加えて、利得等化器1から伝送路に出力される信号光パワーを一定にする必要がある場合には、上述した第4実施形態のような利得等化器1を適用すればよい。また、例えばCバンドおよびLバンドの各信号光が一括して伝送されるようなシステムの場合には、上述した第5実施形態のような利得等化器1を適用すればよい。

【0100】このような構成のWDM光伝送システムでは、動作点や温度等の変動によって生じる各光増幅器5の利得波長特性の変化が、所定の補償区間Lごとに動的に補償されるようになるため、各波長間の光パワー偏差の小さい信号光をWDM光受信機3で受信できる。これにより、広帯域のWDM信号光を長距離にわたって安定して伝送できるため、WDM光伝送システムの伝送容量および伝送距離の拡大を図ることが可能になる。

【0101】次に、上記のようなWDM光伝送システムの応用例について説明する。図17は、本発明による補償技術を適用したWDM光伝送システムの構成例を示すブロック図である。

【0102】図17のWDM光伝送システムは、例えば、1次および2次の補償を行う場合に、利得等化器1の可変光学フィルタ10₁と可変光学フィルタ10₂とを異なる中継区間の終端に配置するようにしたものである。ここでは、補償区間Lのほぼ中央部に位置する中継区間の終端に可変光学フィルタ10₁を設け、補償区間Lのの終端に可変光学フィルタ10₂を設け、該可変光学フィルタ10₂からの出力光を制御部12でモニタして各可変光学フィルタ10₁、10₂の透過波長特性をフィードバック制御するようにしている。

【0103】このように本発明の補償技術は、各次数の補償を1つの補償区間L内の異なる中継区間で分散して

行うことが可能である。ここでは1次および2次の補償を行う場合の一例を示したが、上記の内容は3次以上の補償を行う場合でも同様である。各次数に対応した各々の可変光学フィルタの設定は、補償区間L内にある全ての光増幅器の利得波長特性の変化を考慮して行い、各次数の補償が1つの補償区間Lを単位として行われるようにする。

【0104】

【発明の効果】以上説明したように、本発明の利得等化器によれば、磁気光学効果を利用することで透過率の波長特性が可変であり、かつ、該透過率の波長特性が互いに異なるように設定された複数の可変光学フィルタを組み合わせたときに、複数の可変光学フィルタを透過したWDM信号光のモニタ結果に基づいて各可変光学フィルタの透過波長特性をフィードバック制御するようにしたことで、WDM信号光に生じた光パワーの波長特性に対する動的な補償を高い精度で行うことが可能になる。また、各可変光学フィルタがメカニカルな動作なしに透過波長特性を可変制御することが可能であるため、信頼度の高い利得等化器を実現できる。さらに、各可変光学フィルタに対応したフィードバック制御の時定数を互いに異なるように設定したことで、フィードバック制御が発振してしまうことを防止できる。加えて、挿入損失を補償するための光増幅手段を設ければ、挿入損失のない利得等化器を実現できる。また、出力光パワー制御手段を設けることによって、トータルパワーが一定に制御されたWDM信号光を出力できるようになる。

【0105】本発明による光増幅器は、上記のような効果を有する利得等化器を内部に設けたことで、動作点や温度等の変動により発生する利得波長特性の変化を自動的に補償することが可能になる。

【0106】本発明によるWDM光伝送システムは、上記のような効果を有する利得等化器を所定の補償区間ごとに配置したことで、補償区間内にある光増幅器の利得波長特性の変化が補償区間ごとに動的に補償されるようになるため、各波長間の光パワー偏差の小さい信号光を光受信機で受信できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明による利得等化器の第1実施形態の構成を示すブロック図である。

【図2】本発明による利得等化器に用いられる可変光学フィルタの好ましい構成例を示す図である。

【図3】図2の可変ファラデー回転子の具体的な構成の一例を示す斜視図である。

【図4】図2の可変ファラデー回転子の基本的な透過波長特性について説明する図であって、(A)は透過率が最小となるピーク波長を波長の軸の方向に変化させた場合、(B)はFSRを変化させた場合を示す図である。

【図5】本発明による利得等化器に用いられる1次補償用可変光学フィルタの透過波長特性の設定例を示す図で

ある。

【図6】本発明による利得等化器に用いられる2次補償用可変光学フィルタの透過波長特性の設定例を示す図である。

【図7】本発明における1次補償および2次補償を説明する第1の例示図である。

【図8】本発明における1次補償および2次補償を説明する第2の例示図である。

【図9】本発明における1次補償および2次補償を説明する第3の例示図である。

【図10】本発明による利得等化器の第2実施形態の構成を示すブロック図である。

【図11】本発明による利得等化器に用いられる3次補償用可変光学フィルタの透過波長特性の設定例を示す図である。

【図12】本発明によりn次補償を実現する利得等化器の基本構成を示すブロック図である。

【図13】本発明による利得等化器の第3実施形態の構成を示すブロック図である。

【図14】本発明による利得等化器の第4実施形態の構成を示すブロック図である。

【図15】本発明による利得等化器の第5実施形態の構成を示すブロック図である。

【図16】本発明による利得等化器を用いたWDM光伝送システムの構成を示すブロック図である。

【図17】図16のWDM光伝送システムの応用例を示すブロック図である。

すブロック図である。

【図18】光増幅器の動作点変動による利得波長特性の変化(Cバンド)について説明する図である。

【図19】光増幅器の動作点変動による利得波長特性の変化(Lバンド)について説明する図である。

【符号の説明】

1…利得等化器

2…WDM光送信機

3…WDM光受信機

4…伝送路

5…光増幅器

10₁~10_n, 10_{1C}~10_{nC}, 10_{1L}~10_{nL}…可変光学フィルタ

10A, 10F…レンズ

10B…入力側くさび板(偏光子)

10C…複屈折板

10D…可変ファラデー回転子

10E…出力側くさび板(偏光子)

11, 11_C, 11_L, 20A~20C…光カプラ

12, 12_C, 12_L…制御部

14…出力光パワー制御部

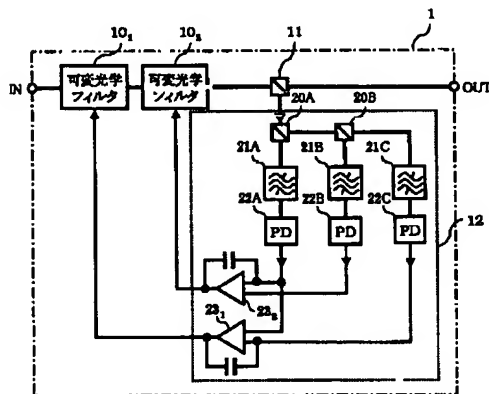
15A, 15B…WDMカプラ

21A~20E…光フィルタ

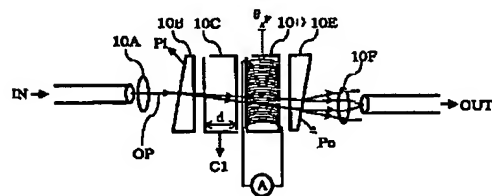
22A~22E…受光素子(PD)

23₁, 23₂, 23₃…演算回路

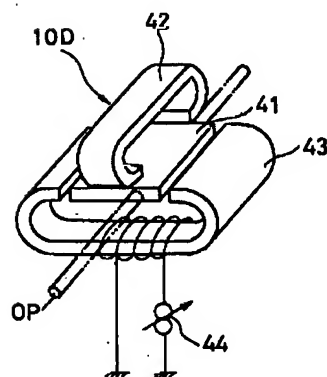
【図1】



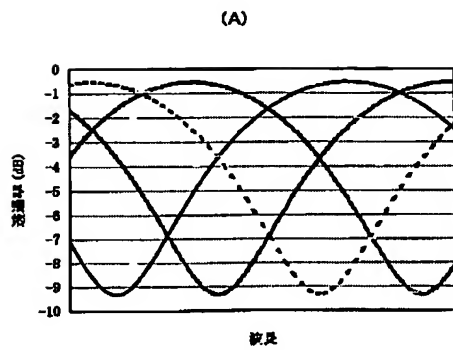
【図2】



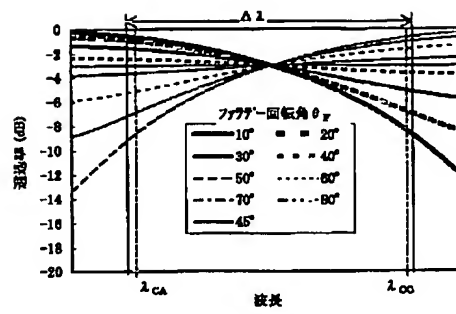
【図3】



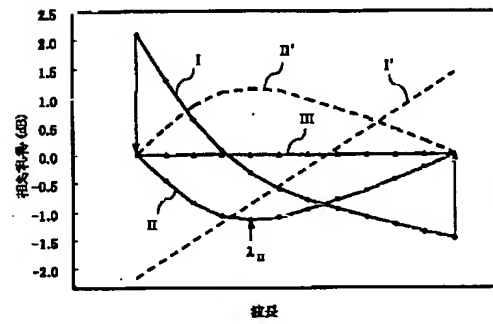
【図4】



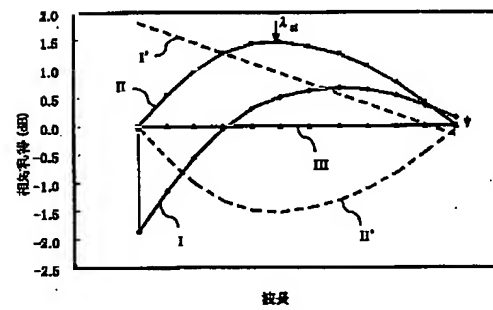
【図5】



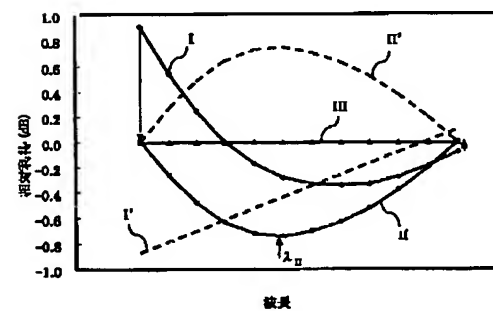
【図7】



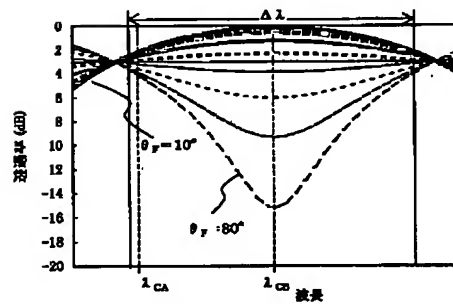
【図8】



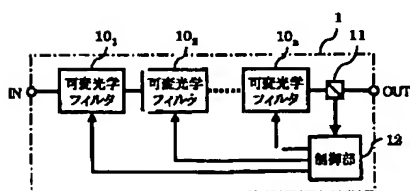
【図9】



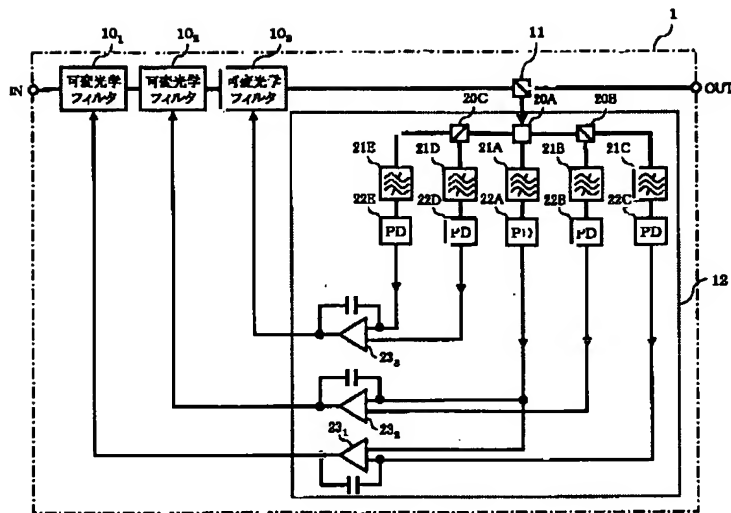
【図6】



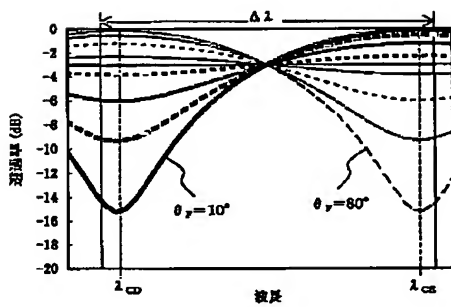
【図12】



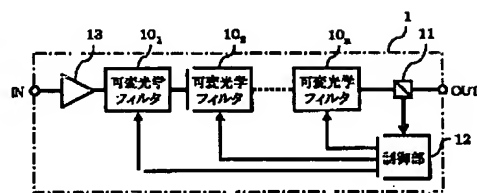
【図10】



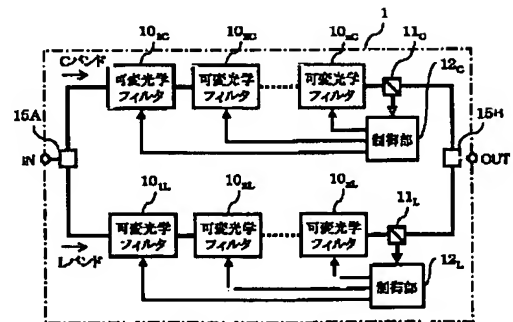
【図11】



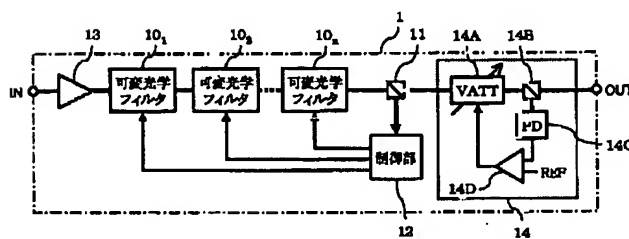
【図13】



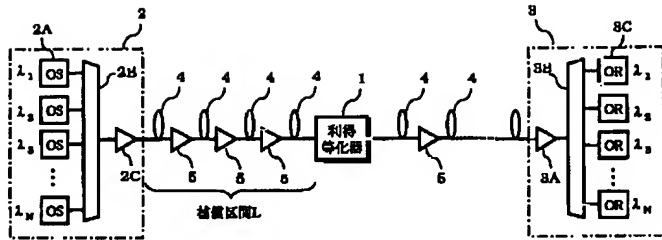
【図15】



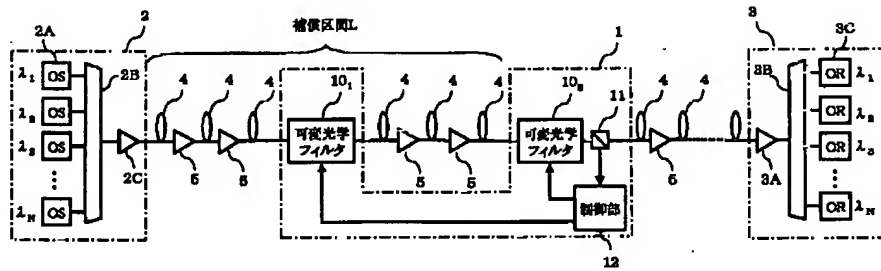
【図14】



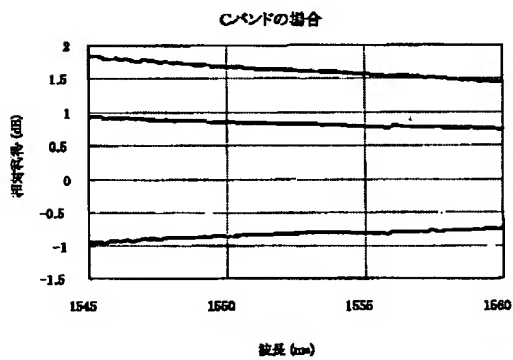
【図16】



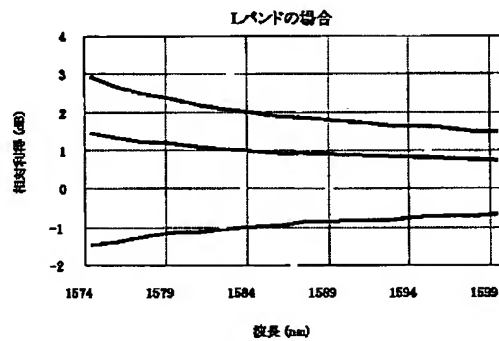
【図17】



【図18】



【図19】



フロントページの続き

(51)Int. Cl.⁷

H04B 10/02

10/18

識別記号

FI

H04B 9/00

M

(参考)

F ターム(参考) 2H049 BA02 BA08 BB03 BB66 BC25
2H079 AA03 BA01 CA04 EA11 EB18
FA01 FA04 HA11 KA01 KA05
KA11 KA19 KA20
2K002 AA02 AB30 BA01 CA15 DA06
HA23
5F072 AB07 AK06 JJ09 JJ20 KK30
MM20 QQ07 YY17
5K002 BA02 CA01 CA10 CA13 DA02